

令和元年6月27日現在

機関番号：82405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00594

研究課題名（和文）位相幾何学的手法を用いた廃棄物埋立層の間隙構造と流体の相互作用の解明

研究課題名（英文）Unveiling the interaction between pore structure and pore-fluid flow in landfills using topological data analysis

研究代表者

鈴木 和将（Suzuki, Kazuyuki）

埼玉県環境科学国際センター・資源循環・廃棄物担当・専門研究員

研究者番号：70379824

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、廃棄物最終処分場における埋立層間隙内の流れに着目して、間隙流数値シミュレーションを実施するとともにパーシステントホモロジーによる位相的データ解析を行った。その結果、純粋数学の一分野である幾何学を活用した新しいアプローチにより、間隙幾何構造と流体特性との関係性を明らかにできたことが、本研究の成果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の位相幾何学的なアプローチは、廃棄物最終処分場のみならず、同様の多孔質材料に適用可能と考えられ、環境、材料科学、資源開発等、幅広い分野への展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：The fluid flow dynamics of the landfill affect the micro-structure of pores in the waste-filled layer. However, there was no adequate method to represent the shape of complicated pore geometries. Recently, topological data analysis (TDA) has been developed as a new approach to characterize the shape of data quantitatively and has been applied to various practical problems such as materials science. In this study, persistent homology and its persistence diagram were used as TDA to analyze the pore structure in waste materials. Persistence diagram was calculated from the data of micro X-ray computed tomography (CT) images of waste materials such as bottom ash and incombustible residue. Then, the pore-fluid flow in waste materials was calculated using CFD. Finally, we investigated relationship between obtained geometry parameters using TDA and simulated pore flow dynamics in landfill.

研究分野：廃棄物工学

キーワード：廃棄物最終処分場 埋立層 間隙構造 数値シミュレーション パーシステントホモロジー パーシステント図 位相的データ解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

種々雑多な廃棄物が埋め立てられている埋立地は、埋立層内部で起こっている現象も分からないまま、経験的な設計や管理が行われており、これが地域の住民にとって安心を保障できない要因となっている。層内部での水・ガスの動きは、埋立地の洗い出しや安定化に大きく影響するため、浸出水・ガスの量を予測することは、埋立地の設計・管理に非常に重要な課題である。埋立層内の間隙構造は、その中を流れるこれら流体特性に大きく影響するものと考えられている。地質学の分野では、岩石に対して、水銀圧入式のポロシメーターを用いた細孔分布から透水係数を推定する評価モデルの検討が行われた¹⁾。また、近年では、X線CTを用いることにより、岩石や土壌などの三次元内部構造を非破壊で観察することが可能となった。しかし、これら従来の方法では、細孔分布や間隙率等を求めることはできないものの、埋立層間隙のような複雑な幾何構造の形を記述することは困難であった。

このような形の記述に関して、数学の位相幾何学的な視点から、Topological Data Analysis (TDA)というデータ解析手法が新たに開発された²⁾。その手法の一つとしてパーシステントホモロジーがあり、これは「穴」に着目した特徴づけを与えるものであり、計算されたパーシステント図からは、穴の数だけでなく、サイズ、形状、階層構造等を扱うことができる。近年、TDAを実社会の問題に応用する研究が進められており、タンパク質の幾何学的な立体構造が、パーシステントホモロジーを用いて調べられ、タンパク質の圧縮率の数学的な特徴づけが行われた³⁾。

本研究において、TDAを適用し、これまで従来法で特徴づけできなかった間隙構造を定量化することができ、さらにその幾何学的パラメータと流体特性を関連づけられれば、埋立地における流体予測を精度良く可能とする新しい数理モデル構築へ展開するものと予想された。

2. 研究の目的

上記の研究背景をもとに、本研究では、パーシステントホモロジー群という位相幾何学の道具を用いて、間隙構造の定量化及び特徴的な空洞の情報を抽出し、この幾何構造と流体挙動の指標である透水係数等との相関を調べることにより、間隙部分のどのような構造が流体特性を支配するのか明らかにするとともに、埋立地における浸出水・ガスの正確な予測制御の実現を可能とする数理モデルの構築を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 間隙内数値流体解析

① 間隙形状のモデリングと有限要素メッシュ生成

マイクロフォーカス X線 CT 装置を用いて撮影した廃棄物試料(焼却灰、埋立廃棄物のコアサンプル等)の CT 画像を画像処理ソフトウェアに読み込み、モデル間隙形状の作成を行った。さらに、作成した間隙形状のデータを STL ファイルへ変換し、この STL ファイルを基に、自動メッシュ生成ソフトウェア Gmsh⁴⁾を用いて有限要素メッシュの生成を行った。

② 支配方程式と数値解析

支配方程式には、下記に示す非圧縮性 Navier-Stokes 方程式、連続の式を用いた。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

ここで、 u は流速、 p は圧力、 ρ は密度、 μ は粘性係数である。

上記の支配方程式に対して、Tezduyar^{5,6)}らによって提案された SUPG(Streamline Upwind/Petrov-Galerkin)/ PSPG(Pressure Stabilizing/Petrov Galerkin)法に基づく安定化有限要素法⁷⁾を適用すると以下のように弱形式が導かれる。

$$\int_{\Omega} w_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) d\Omega - \frac{1}{\rho} \int_{\Omega} \frac{\partial w_i}{\partial x_i} p d\Omega + \frac{\mu}{\rho} \int_{\Omega} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e} \left(\beta \bar{u}_k \frac{\partial w_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega = 0$$

$$\int_{\Omega} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega} \left(\beta \frac{\partial q}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega = 0$$

w_i, q は、それぞれ式(1),(2)に対する Galerkin 項の重み関数である。また、 \bar{u}_i は移流速度を表し、 β は安定化パラメータである。これら(3),(4)式に対して、空間の離散化要素には、四面体 1 次要素を用い、時間方向の離散化には、Crank-Nicolson 法を適用した。なお、最終的に得られる連立一次方程式の解法には GPBi-CG⁸⁾法を適用した。本研究では、計算の高速化を達成するため

に、NVIDIA 社の統合開発環境である CUDA と cuBLAS, cuSPARSE 等のライブラリを用いて GPBi-CG の並列化を行い、GPU スパコンを利用して計算を実施した。

(2) パーシステントホモロジーによる間隙構造解析

構造解析には、実際の廃棄物試料を用いるとともに、間隙構造と流体特性の関係を詳細に検討するためにより単純化した系として、三次元空間にランダムに球を配置した計算モデル（模擬間隙構造、図 1）を用いた。実試料においては X 線 CT 白黒断層画像を、模擬間隙構造においては計算モデルから抽出した白黒断層画像を入力データとし、データ解析ソフトウェア HomCloud を用い、パーシステント図の計算及び逆解析を行った。

ここで得られた間隙形状の幾何学パラメータと数値解析から得た流体特性の関係を重回帰分析した。

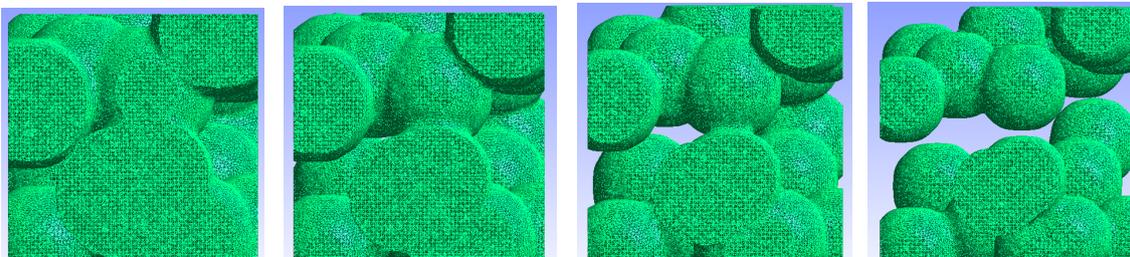


図 1 模擬間隙構造 (R=17, 15, 13, 11)

4. 研究成果

(1) マルチ GPU による流体シミュレーションの高速化

埋立処分場間隙内の流れの数値シミュレーションを行った。時間刻み幅を 1.0×10^{-2} sec として 100 ステップを計算し、解析対象とした有限要素メッシュは、節点数 99,560、要素数 437,386 である。計算効率を計算するために、CPU1 コア (1CPU)、CPU1 コアと GPU1 コア (1CPU+1GPU)、CPU2 コア (2CPU) と CPU2 コアと GPU2 コア (2CPU+2GPU) のそれぞれを用いた時の解析に要した時間を計測した。計測結果を表 1 に示す。1GPU では、1CPU と比較して 9.0 倍高速化を実現した。2GPU+2CPU では、2CPU と比較して 8.5 倍、1CPU と比較して 16.3 倍と大幅に高速化した。また、図 2 に数値シミュレーション結果を示す。速度ベクトルの様子は、GPU、CPU どちらも同じ結果となった。以上の結果より、マルチ GPU を用いて間隙流れ数値シミュレーションを高速に行う手法の構築に成功した。

表 1 計測結果

計算環境	計算時間 (sec)
1CPU	1.48×10^5
1CPU+1GPU	1.65×10^4
2CPU	7.69×10^4
2CPU+2GPU	9.06×10^3

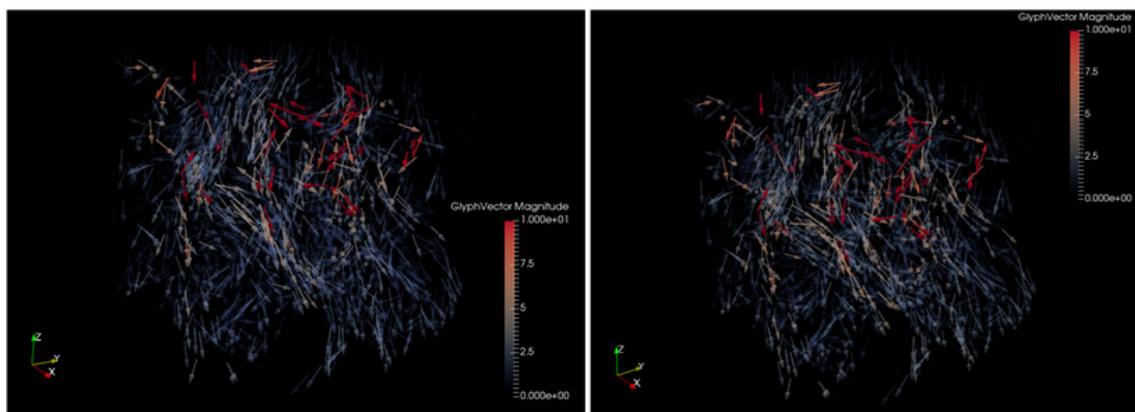


図 2 数値シミュレーション結果 (左図:1CPU+1GPU 計算結果、右図 : 1CPU 計算結果)

(2) 模擬間隙構造

模擬間隙構造に対して、数値シミュレーションにより流れ場計算を行った。間隙内流れの状況を流線として図化した結果を図 3 に示す。流線は、流れ遅い箇所では青色、流れの速い箇所は赤色で表示する。また、図の上部が流入面、下部が流出面であり、流入面は、一様流を与えた Dirichlet 条件である。図 3 に示されているように、モデル領域の球が結合する箇所の狭く部や分岐部で大きな流れの変化が見られた。また、球径を変化させて数値シミュレーションを行った結果、球径が大きくなるに従い、新しい流路形成が認められた。

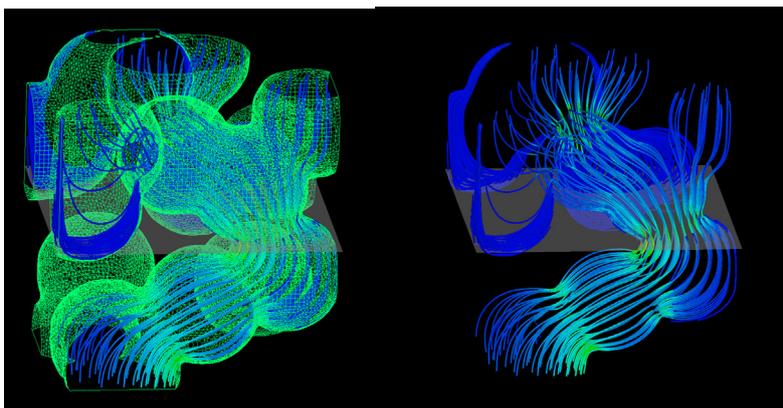


図3 模擬間隙内流れの様子（流線、R=13）

そこで、球径の違いによる間隙流れの影響を定量的に評価するため、流入境界と流出境界の圧力を変化させ、間隙流数值シミュレーションを行った。圧力差と出口流量の関係を図4に示す。球径が小さくなると、圧力損失が大きくなり、出口流量が減少した。本研究では、この差圧と流量の関係から透水係数を求め、流体特性を表すパラメータとして用いた。

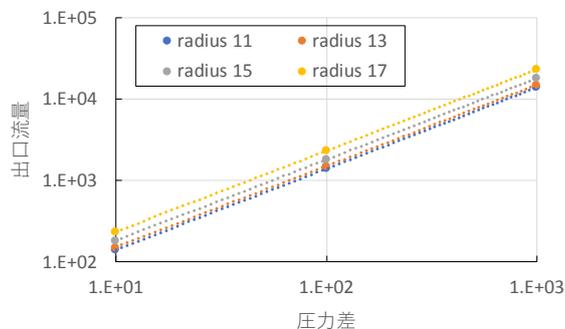


図4 間隙内の圧力差と出口流量の関係

これら球径を変化させた模擬間隙構造に対してパーシステントホモロジー図を計算した。2次のパーシステント図（2次元の「穴」空洞を表す）を図5に示す。パーシステント図は、球径の違う間隙構造の違いを表すことができ、球径が大きくなるにしたがい、Birth time（発生時刻）、Death time（消滅時刻）ともに増加していった。

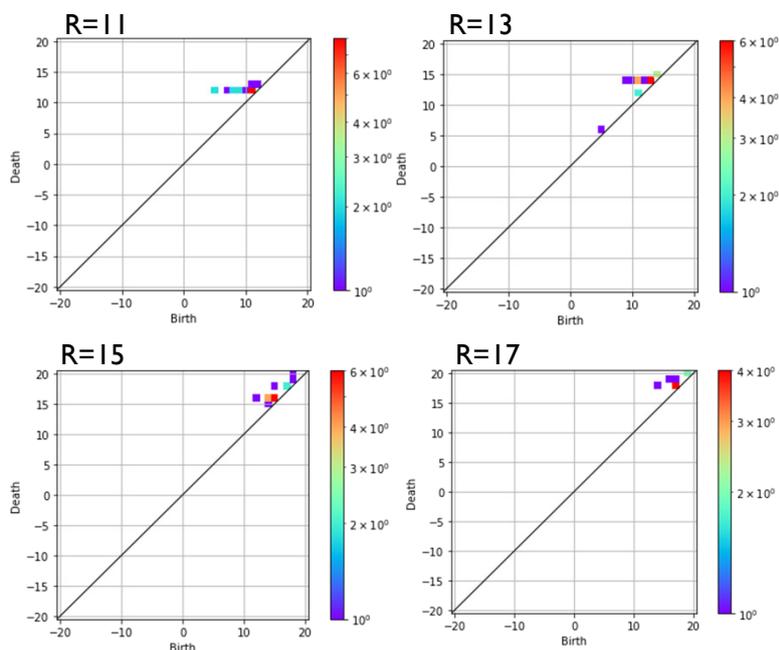


図5 模擬間隙構造の2次のパーシステント図

ここで得られた幾何学パラメータと流体特性との関係を明らかにするため、目的変数を透水係数 (y)、説明変数を発生時刻 (X1)、消滅時刻 (X2)、空洞の数 (X3) とし、重回帰分析を行った。重回帰分析の以下の通りであった。

$$Y = 3.24 \times 10^{-8} X1 + 7.21 \times 10^{-8} X2 - 1.8 \times 10^{-7} X3 + 5.91 \times 10^{-6} \quad \text{重相関係数 } R=0.96$$

以上の結果より、位相幾何学的手法で得られた幾何学パラメータと流体特性の関係を定量的にあらわすことができた。

(3) 実廃棄物試料の間隙構造

実廃棄物試料（焼却灰、処分場コアサンプル、不燃残さ）を用いた検討においても、パーシステントホモロジー図により、試料の幾何構造の違いを表すことができた。焼却灰のパーシステント図の解析（2次）とその逆解析結果を図6に示す。逆解析は、対角線から離れた赤い丸印の中の点について行った結果である。パーシステント図において対角線から離れた点は、ロバストな穴を表しているが、解析した点は、赤矢印が示すはっきりとした空隙構造に対応していることが分かった。この空隙構造は、主要な間隙内流路の一つである。

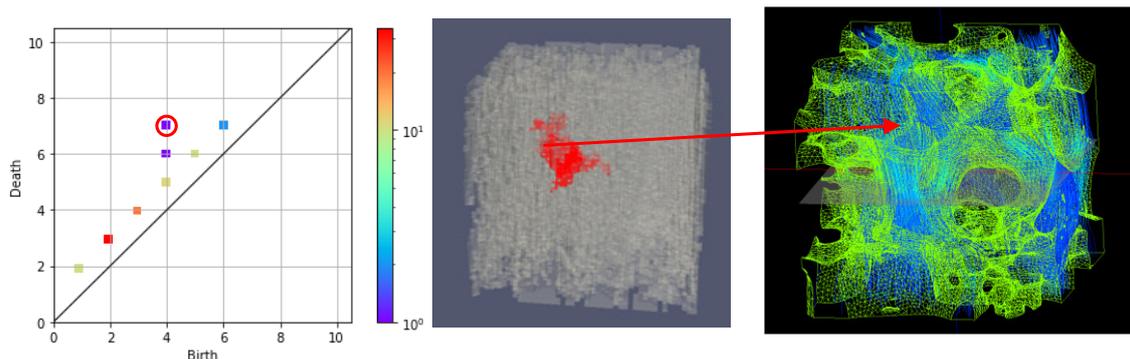


図6 パーシステント図の解析及び逆解析の結果（左図：パーシステント図、中央図：逆解析の結果、右図：流体数値シミュレーションの結果）

<引用文献>

- 1) 林為人, 高橋学, 西田薫, 張銘: 透水挙動に関する等価管路モデルおよび堆積岩への適用例、*応用地質*, 39, 6, 533-539 (1999)
- 2) Edelsbrunner, H. Letscher, D. & Zomorodian, A.: Topological persistence and simplification, *Discrete Comput. Geom.*, 28(4), 511-533 (2002)
- 3) 平岡裕章: パーシステントホモロジー群 --離散データのトポロジカル解析--, *COE Lecture Note*, 46, 63-73 (2013)
- 4) Geuzaine, C. and Remacle, J.F.: Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post- processing facilities, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79(11), 1309-1331 (2009)
- 5) Tezduyar, T.E.: Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, *Advanced in Applied Mechanics*, 28, 1-44 (1991)
- 6) Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. & Shih, R.: Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95, 221-242 (1992)
- 7) 日本計算工学会流れの有限要素法研究委員会編: 続・有限要素法による流れのシミュレーション、シュプリンガー・ジャパン (2008)

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

- ① 鈴木和将, Huynh Quang Huy Viet, 宇田智紀, 水藤寛: 安定化有限要素法による廃棄物最終処分場間隙流れの数値シミュレーション, 平成30年度廃棄物資源循環学会関東支部研究発表会(2019)
- ② Kazuyuki Suzuki, Huynh Quang Huy Viet, Tomoki Uda, Hiroshi Suito: Numerical simulation of pore-fluid flow in landfills using stabilized finite element method, Proceedings of the 10th Asia-Pacific Landfill Symposium, P-14(2018)
- ③ 鈴木和将, Huynh Quang Huy Viet, 宇田智紀, 水藤寛: 数値シミュレーションによる廃棄物層間隙流れの流体力学特性の評価, 第29回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, D2-

3-O(2018)

- ④ 鈴木和将, Huynh Quang Huy Viet, 水藤寛 : GPUスパコンを用いた廃棄物埋立層内の数値流体シミュレーション, 第28回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, D2-5-O(2017)
- ⑤ 鈴木和将, 水藤寛 : 廃棄物最終処分場における埋立層間隙内の気液二相流数値解析, 第27回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, D4-11-P(2016)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 水藤 寛

ローマ字氏名 : Hiroshi Suito

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。